



Title	体積後方散乱強度の周波数差を利用した北海道噴火湾周辺におけるオキアミ類とカイアシ類の識別
Author(s)	金, 銀好; 向井, 徹; 飯田, 浩二
Citation	日本水産学会誌, 82(4), 587-600 https://doi.org/10.2331/suisan.15-00039
Issue Date	2016-07-15
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/66614
Rights	© 2016 公益社団法人日本水産学会
Type	journal article
File Information	Hokudai_KIMEUNHO.pdf



体積後方散乱強度の周波数差を利用した北海道噴火湾周辺におけるオキアミ類とカイアシ類の識別

ランニングタイトル：周波数差による動物プランクトンの識別

金 銀好, ^{1*} 向井 徹, ² 飯田浩二 ²

¹北海道大学大学院水産科学院, ²北海道大学大学院水産科学研究院

Acoustic identification of krill and copepods using frequencies difference of volume backscattering strength around Funka Bay, Hokkaido, Japan

E_{UNHO} KIM,^{1*} T_{OH}RU MUKAI² AND K_{OH}JI IIDA²

¹Graduate School of Fisheries Sciences, Hokkaido University, Minato, Hakodate, Hokkaido, 041-8611, Japan, ²Faculty of Fisheries Sciences, Hokkaido University, Minato, Hakodate, Hokkaido, 041-8611, Japan

*Tel: 81-138-40-8853. Fax: 81-138-40-8852. Email: kimeunho4@gmail.com

体積後方散乱強度の周波数差を利用した北海道噴火湾周辺におけるオキアミ類とカイアシ類の識別

金 銀好，向井 徹，飯田浩二（北大院水）

北海道噴火湾周辺海域において，周波数 38, 120, 200 kHz の計量魚群探知機を用いて音響散乱層の特徴を調べ，その構成生物であるオキアミ類とカイアシ類の識別方法を検討した。生物の確認は，直径 80 cm のリングネットによる垂直曳網で行った。オキアミ類とカイアシ類は，周波数 38 kHz よりも 120 kHz と 200 kHz でより強い音響散乱を示し，さらにこれら 2 周波数の SV 差は，オキアミ類で -1.5 - 1.3 dB，カイアシ類で 2.2 - 3.7 dB となり，この SV 差を利用して両種を識別する可能性が示された。

キーワード：オキアミ類，カイアシ類，周波数差法，体積後方散乱強度（SV）

英文要旨：

In and around Funka Bay in southwest Hokkaido, Japan, krill and copepods are the dominant species of zooplankton. In this area, they are important prey for walleye pollock *Gadus chalcogrammus* and other marine animals. In this study, we examined the possibility of identifying krill and copepods based on differences in volume backscattering strengths at different frequencies. Acoustic surveys were conducted in and around Funka Bay in March 2012 aboard the T/S *Ushio-maru* using a Simrad EK60 quantitative echo sounder. The acoustic data were collected at 38, 120 and 200 kHz. Biological samples were collected by the ring net with vertical towing. To identify the krill and copepods, differences in volume backscattering strengths at the three frequencies were examined. Krill and copepods showed stronger response at 120 and 200 kHz than at 38 kHz. The results showed that the differences in volume backscattering strengths between 120 and 200 kHz ($\Delta SV_{200-120\text{kHz}}$) were -1.5 - 1.3 dB for krill and 2.2 - 3.7 dB for copepods. Based on these differences between frequencies, we were able to identify krill and copepods.

北海道南部に位置する噴火湾は、大陸棚が広く形成されており、季節的な海上風の影響などによって年間を通して、親潮、沿岸親潮、津軽暖流水が流入し多様な海洋環境を形成する。このような海洋環境の季節変動は、噴火湾や周辺海域に分布する植物プランクトンの発生だけでなく、動物プランクトンや魚類など海洋生物の分布に直接的な影響を与えている。また、噴火湾は、日本の TAC 管理対象種であるスケトウダラ *Gadus chalcogrammus* の主要産卵場及び生育場であり、スケトウダラ稚魚は噴火湾内でカイアシ類とオキアミ類を摂餌して成長する。¹⁻³⁾ その後、スケトウダラは湾外に移動し、成長とともに資源豊富な漁場を形成する。このように噴火湾とその周辺海域は、物理、化学、生物学的側面から重要な海域であり多くの研究成果が報告されている。特に、スケトウダラの餌資源となるカイアシ類やオキアミ類に関する調査研究は現在でも活発に行われている。⁴⁻⁶⁾ しかし、噴火湾およびその周辺海域に分布する生物の調査はネット採集中心に行われ、北海道東部海域⁷⁾や三陸海域⁸⁻¹⁰⁾で行われているような音響による調査は少ない。また、カイアシ類は、表中層に分布する動物プランクトン生物量の 80－95%を占めるにもかかわらず、^{11, 12)} 噴火湾周辺海域に分布するカイアシ類の音響調査の報告はほとんどない。

一方、音響調査においては、体積後方散乱強度（以下、SV とする。）などの音響データの取得のほか、対象生物の直接的な確認も不可欠であり、トロールなどを併用することで生物の種類や大きさを高精度に推定することができるようになった。¹³⁻¹⁵⁾ また、魚類と動物プランクトンの音響散乱の周波数特性を利用して、複数周波数を使用した両者の識別が可能となり、現在、さらに小型の動物プランクトンの識別を行うためにより高い周波数の利用が期待されている。¹⁶⁻²⁰⁾

古澤²¹⁾ は、高低 2 周波数の SV の差を利用して音響散乱層を構成する生物のサイズ推定及び密度推定の可能性を示唆した。また、Kang *et al.*,⁹⁾ Miyashita *et al.*^{7, 8)}, Swartzman *et al.*²²⁾ は、採集した魚類とプランクトンの 2 周波数におけるターゲットストレングス（以下、TS とする。）を理論モデルを用いて推定し、これらの周波数差を用いて両者の判別を行った。一方、Madureira *et al.*²³⁾ は、大小 2 種類のオキアミ類と 1 種類の端脚類の判別を試み、3 種を音響的に判別することに成功している。また、これらの判別には周波数 38kHz と 120kHz の組み合わせが有効であるが、定量化には 120kHz と 200kHz の方が有効であると述べている。しかしながら、カイアシ類については、低周波数による探知が難しく、^{10, 23)} 高周波数においては探知距離の制約があり、2 周波数を用いた同種の識別は難しい。^{24, 25)}

そこで本研究は、3 周波数を用いて噴火湾周辺海域に生息するオキアミ類とカイアシ類を対象にした音響調査を行い、それら 2 種の識別法を検討した。音響手法を用いて生物量を推定するためには、対象生物の正確な TS が必要となる。しかし、動物プランクトンは魚類に比べて微小であるばかりでなく、ガスを持たない生物であるためその TS は小さく、実測することは極めて難しい。そこで、本研究では理論モデルにより 3 周波数におけるオキアミ類とカイアシ類の TS を推定し、そのうち 2 周波数における TS の差分値を用いてオキアミ類とカイアシ類の識別を試みた。さらに、現場において測定された SV の差分値とプランクトンネットによる採集生物の比較から両種の判別の有効性を検討した。そして、周波数差分に基づいて識別のうえ、音響的に推定した両種の生物密度と、プランクトンネットの採集により推定した生物密度を比較することにより、両種の識別に最も適した周波数の組み

合わせについて検討した。

材料と方法

音響データの収録と解析 実験は 2012 年 3 月 8 日－10 日、北海道南部に位置する噴火湾周辺海域において、北海道大学附属練習船うしお丸（179 トン）を用いて行った。調査海域は噴火湾内外の海域で、合計 18 の調査定点を設定した（Fig. 1）。調査定点間は船速 10 ノットで航走し、定点間および定点で音響データを収録した。音響データは、うしお丸に搭載された周波数 38, 120, 200 kHz の計量魚群探知機 EK60（SIMRAD, Kongsberg, Norway）を用いてパルス間隔 1 s で収集し、深度 3 m から海底または深度 500 m までの SV（dB）を測定した。使用した計量魚群探知機のパラメーターを Table 1 に示す。

Fig. 1

Table 1

SV の差分値の解析は、各定点に停船して行った生物採集のときに収録した音響データについて音響解析ソフト Echoview 6（Myriax, Australia）を用いて行い、積分間隔を深さ 2 m、水平 10 ping を 1 セルとして、その範囲の SV を平均した。また、船底付近に発生する気泡や船の雑音を除去するため、船底から深度 10 m までのデータは除外し、高周波数における探知距離を考慮して深度 200 m までを解析対象とした。スレッシュホールドレベルの設定は、38 kHz と 120 kHz については -100 dB としたが、200 kHz におけるノイズレベルが、停船した状態において深度 100 m で -103 dB、深度 200 m で -87 dB であったため、200 kHz のスレッシュホールドレベルを -93 dB とし、かつ深度 100 m 以浅のデータのみを解析に用いた。²⁶⁾ 音響システムの較正は、北海道臼尻沿岸の水深約 60 m の地点において較正球（直径 38.1 mm のタングステンカーバイド製標準球）を用いて行った。²⁷⁾

周波数差法による分類群識別 散乱体が均一不規則，かつビームの開きに対して広範囲に分布している場合，周波数 f における SV は次の式で定義される。

$$\begin{aligned} SV(f) &= 10 \log Sv(f) \\ &= 10 \log n Ts(f) \end{aligned} \tag{1}$$

ここで $Sv(f)$ は，周波数 f における体積後方散乱係数で， $SV(f)$ の線形量である。 n は単位体積あたりの生物の個体数（以下，個体数密度とする。）（ind/m³）， $Ts(f)$ は周波数 f における生物の後方散乱断面積である。（1）式において，複数の周波数で同じ範囲を探知している場合，周波数にかかわらず n は同一であるから， Sv の周波数特性は Ts の周波数特性に等しくなる。

一般に，音響散乱層を構成している動物プランクトンの音響散乱は体サイズや体組織に基づく固有の周波数特性を有している。したがって，一般的な計量魚群探知機の周波数である周波数 38，120，200 kHz の 3 周波数のうちから 2 つを選び，それぞれの SV の差分（以下， SV の周波数差として， ΔSV_{HF-LF} と表記する。添え字の $HF-LF$ は，高周波の値 から低周波の値を引き算することを意味し，例えば $\Delta SV_{120-38kHz}$ は周波数 120 kHz の SV と周波数 38 kHz の SV の引き算を意味する。）を利用してオキアミ類とカイアシ類の識別を試みた。^{8, 10)}

（1）式から差分について次式が成立する。

$$\begin{aligned} \Delta SV_{HF-LF} &= SV_{HF} - SV_{LF} \\ &= TS_{HF} - TS_{LF} \end{aligned} \tag{2}$$

したがってオキアミ類とカイアシ類の TS の差が異なれば，（2）式により SV の周波数差を用いて両者を識別することができる。さらにオキアミ類とカイアシ類に識別された SV データと，両種の TS を用いて，

(1) 式によりそれぞれの個体数密度を求め、²⁶⁾ さらに個体数密度に生物の平均湿重量を乗じて単位体積あたりの湿重量（以下、湿重量密度とする。）（mg/m³）を求めた。

理論モデルによる動物プランクトンの後方散乱断面積の推定 対象生物の後方散乱断面積の周波数特性は、理論モデルにより推定した。使用したモデルは一般にオキアミ類とカイアシ類の音響散乱特性の推定に用いられる Distorted-Wave Born Approximation (DWBA) 変形円筒モデルである。このモデルは、散乱体の生体密度や生体音速が海水に近い場合に有効であり、²⁸⁻³⁰⁾ 散乱体の形状が体軸に沿った円筒薄片の集合とみなすことができる場合、次の式で散乱振幅 f_{bs} , TS を表すことができる。

$$f_{bs} = \int_{r_{pos}} \frac{k_{sw}^2 a_c}{4k_{animal}} \left(\frac{1+h^2}{gh^2} - 2 \right) \times e^{2ik_{animal}r_{pos}} \frac{J_1(2k_{animal}a_c \cos \beta_{tilt})}{\cos \beta_{tilt}} |dr_{pos}| \quad (3)$$

$$TS = 10 \log |f_{bs}|^2 \quad (4)$$

ここで、 r_{pos} は円筒薄片の体軸上の位置ベクトル、 k は波数であり、添え字の sw と $animal$ はそれぞれ海水と生物であることを示す。 a_c は各円筒薄片の半径、 J_1 は第 1 種第 1 次ベッセル関数、 β_{tilt} は入射波と円筒の軸方向とのなす角度を示す。 g は生物と周囲媒質との密度比、 h は生物と周囲媒質との音速比をあらわす。本研究では、北海道周辺海域における既往の知見から、カイアシ類の音速比に 1.021, 密度比に 0.998³¹⁾ を用い、また、オキアミ類については音速比 1.029, 密度比 1.053³²⁾ を採用した。オキアミ類とカイアシ類の体形座標は、プランクトンネットを用いて採集したオキアミ類とカイアシ類を側面方向から撮影したデジタルカメラ画像をもとに、画像処理ソフトウェア ImageJ^{33, 34)} を使用して輪郭をディジタイジングして求めた。また、異なるサイズ

のオキアミ類やカイアシ類の輪郭データは、代表的な形状の個体の輪郭データを拡大・縮小することで得た。これらのパラメーターを用いて、McGehee *et al.*²⁹⁾ による MATLAB (Mathworks) コードを一部改変して TS の計算を行った。さらに対象生物の TS の平均値である TS_{avg} を求めるにあたり、両種の遊泳姿勢角の頻度分布を知る必要がある。³⁵⁾ 遊泳姿勢角の分布は正規分布で仮定し、カイアシ類については平均 0° 、標準偏差 30° の正規分布 $N(0^\circ, 30^\circ)$ 、オキアミ類については平均 30.4° 、標準偏差 19.9° の正規分布 $N(30.4^\circ, 19.9^\circ)$ を採用した。^{30, 36)}

生物採集と分類 音響散乱層を構成する動物プランクトンを確認するため、各定点においてプランクトンネットの垂直曳網による生物採集を行った。定点に到着してすぐ CTD (Sea bird, SBE 43) により水温・塩分を調べるとともに、計量魚群探知機のエコーグラムを観察し、音響散乱層の深度を確認した。そして、フローメータを取り付けた直径 80 cm の Ring-net (mesh size $500\ \mu\text{m}$) を使用して、音響散乱層の下縁から水面まで、あるいは、海底上 10 m から水面までをそれぞれ 1–4 回ずつ垂直曳網し生物を採集した。ネットの曳網速度は 1 m/s とし、深度ロガー (MDS5, Alec) をネットの網口に取り付け曳網深度を確認した。なお、日没時には生物の日周鉛直移動が確認されたが、生物採集と音響データの収録は昼間および夜間に行った。

一般に、オキアミ類は、昼間は 100 m 以深の中層に分布し、夜間には深度 50 m 以浅にまで浮上することが知られている。³⁷⁻⁴¹⁾ しかし、オキアミ類は比較的遊泳能力が高く、小型のプランクトンネットの曳網では多くの個体が網口から逃避するため、定量採集が難しい。^{42, 43)} 一方、カイアシ類は表層から深度 150 m まで広範囲に分布し、顕著な日周鉛直移動は行わないとされている。⁴⁴⁻⁴⁶⁾

そこで、音響散乱層の構成生物を確認するため、日没前後約 1 時間、停船して音響観測を行うとともに、プランクトンネットを用いた反復垂直曳網を行い、鉛直移動する音響散乱層の採集生物の変化を調べた。
47)

採集した生物は、現場において 10%ホルマリン溶液で固定した。そして後日、元田式プランクトン分割器を利用して 1-1/8 に分割した。
48) 分割した試料はほとんどが大型動物プランクトンであり、カイアシ類、オキアミ類、端脚類、ヤムシ類、稚魚、その他の 6 種類に分類した後、種毎に個体数を計数した。また、カイアシ類は頭胸甲長 (Prosome Length) (以下、PL とする。) を、オキアミ類では全長 (Total Length) (以下、TL とする。) を電子ノギス (Mitutoyo, Absolute 500) を用いて 0.1 mm の桁まで測定した。以降、カイアシ類の PL およびオキアミ類の TL はどちらも体長 (Body Length) (以下、BL とする。) と標記する。さらに、電子秤 (METTLER, AE200) を利用して 0.01 mg の桁まで湿重量を測定した。これらの個体数、湿重量をフローメータの回転数から求めた濾水量で除すことにより、オキアミ類とカイアシ類の個体数密度、湿重量密度を求めた。

結果

音響散乱層のエコーグラム 昼間、定点 E から L への移動中に収録した 3 周波数のエコーグラムを Fig. 2 に示す。上から順に周波数 38 kHz, 120 kHz, 200 kHz である。各エコーグラムの左端が定点 E、右端が定点 L であり、CTD による両定点における水温 T と塩分 S の鉛直プロファイルも示した。親潮はオホーツク海を経由して 2 月頃から噴火湾に流入し始め、3 月、4 月には噴火湾全海域において低温 ($T \leq 3^{\circ}\text{C}$)、低

Fig. 2

塩分 ($32.0 \text{ psu} < S < 33.3 \text{ psu}$) の親潮系水が優占する。^{49, 50)} 本調査は 2012 年 3 月初めに行われており、その時の表層の水温は 3°C 以下、塩分は 33.5 psu 以下であり親潮系水が噴火湾周辺に分布していることが示された。エコーグラムを見ると、3 種類の特徴的な音響散乱層が確認できる。すなわち、周波数 38 kHz (Fig. 2a) で特に強く、定点 E から距離約 10 km に渡り表層から深度 50 m に見られる散乱層、周波数 120 kHz (Fig. 2b) と 200 kHz (Fig. 2c) で強く、深度 $100\text{--}200 \text{ m}$ に見られる厚さ約 50 m の長い帯状の散乱層、そして定点 L 付近の表層から深度 50 m にかけて見られる、SV は小さいが周波数 200 kHz (Fig. 2c) だけに特徴的にみられる散乱層の 3 種類である。

採集生物 プランクトンネットにより、オキアミ類、カイアシ類、小型のクラゲ類、オタマボヤ類、魚類の卵、ゼラチン状生物と仔稚魚が採集された。カイアシ類は噴火湾内・湾外全域で広く採集されたのに対して、オキアミ類は湾外で主に採集され、スケトウダラの稚魚は湾内で多数採集された。オキアミ類では *Euphausia pacifica* ならびに *Thysanoessa inermis*、カイアシ類では *Neocalanus cristatus* ならびに *Eucalanus bungii* が優占しており、本研究ではこれらをまとめてオキアミ類およびカイアシ類とした。

各調査定点で確認された音響散乱層の深度とネット曳網深度および各曳網で採集された主要な生物とその平均体長、個体数密度、湿重量密度、個体数割合、湿重量割合を Table 2 に示した。さらに、全調査定点で採集されたオキアミ類とカイアシ類の体長分布を Fig. 3 に示した。オキアミ類の体長範囲は $2\text{--}22 \text{ mm}$ で、平均体長と標準偏差はそれぞれ 13.4 mm , 3.8 mm であった。一方、カイアシ類の体長範囲は $1\text{--}7 \text{ mm}$ で平均 2.5 mm 、標準偏差 1.1 mm であった。そのうち $1\text{--}3 \text{ mm}$ の小型

Table 2

Fig. 3

の個体が 8 割以上を占め、体長 3 mm 以上の個体は少なかった。

次に、日没前後に鉛直移動する音響散乱層の反復垂直曳網時のエコーグラムと採集生物の内訳を Fig. 4 に示した。エコーグラムには、プランクトンネットの曳網軌跡も示した。音響散乱層は周波数 120 kHz と 200 kHz において特に顕著に記録され、日没前後には深度約 70 m から表層まで上昇した (Fig. 4a)。この時の採集生物の内訳を Fig. 4b で見ると、カイアシ類は全ての曳網で比較的安定に採集されたのに対し、オキアミ類は音響散乱層が曳網深度に到達以降急激に増加した。このことから、周波数 120 kHz と 200 kHz に顕著に現れ、鉛直移動する音響散乱層の主な構成生物はオキアミ類であり、カイアシ類は表層から深度 100 m まで一様に分布するものと考えられた。

Fig. 4

理論モデルによるオキアミ類とカイアシ類の TS 推定 オキアミ類とカイアシ類について、DWBA 変形円筒モデルで推定し遊泳姿勢で平均化したターゲットストレングス TS_{avg} を Fig. 5 に示す。横軸は体長、縦軸は 3 周波数の TS_{avg} を示し、オキアミ類の TS (Fig. 5a) は、3 周波数とも体長とともに増加し、体長 10 mm 以下ではその変化が大きく、体長が大きくなるほど TS の増加率は低下した。また、体長 13–16 mm では周波数 120 kHz と 200 kHz の TS がほぼ一致し、16–25 mm の範囲では周波数 120 kHz の TS が 200 kHz の TS より大きくなった。一方、カイアシ類 (Fig. 5b) も、3 周波数において体長の増加とともに TS が大きくなった。カイアシ類の TS はオキアミ類の TS より小さく、体長が 1–5 mm においては 3 周波数いずれも体長の増加とともに TS が急激に増加した。

Fig. 5

これら両種の周波数特性を用いて (2) 式により TS の周波数差を調べたものを Fig. 6 に示す。(a) がオキアミ類、(b) がカイアシ類で、

Fig. 6

両図とも横軸は体長、縦軸は 2 周波数における TS の差を示す。オキアミ類とカイアシ類ともに TS の差は $\Delta TS_{200-38\text{kHz}}$ （点線）が最も大きく、 $\Delta TS_{200-120\text{kHz}}$ （実線）が最も小さかった。また、オキアミ類においては ΔTS の値は、 $\Delta TS_{120-38\text{kHz}}$ （破線）では体長の増加とともに単調に減少したが、 $\Delta TS_{200-38\text{kHz}}$ （点線）と $\Delta TS_{200-120\text{kHz}}$ （実線）では、体長 20 mm 付近で減少から増加に転じた。

オキアミ類とカイアシ類の音響散乱特性 プランクトンネットで採集したオキアミ類とカイアシ類の体長分布（Fig. 3）を用いて DWBA 変形円筒モデルでそれぞれのサイズの TS を推定し、各周波数における両種の TS 分布を求めたものを Fig. 7 の上段 a–c に示す。オキアミ類の TS のモードは 38 kHz で -95–-90 dB, 120 kHz で -85–-80 dB, 200 kHz で -80–-75 dB であり、38 kHz が最も小さかった。一方、カイアシ類の TS のモードは、38 kHz で -145–-140 dB, 120 kHz で -125–-120 dB, 200 kHz で -120–-115 dB であり、やはり 38 kHz が最も小さかった。両者を比べると、オキアミ類の TS は全ての周波数においてカイアシ類よりも大きく、その分布の幅は狭かった。

Fig. 7

次に、定点観測において、エコーグラム上で両種の音響散乱層が明瞭に識別でき、かつ、ネット採集でオキアミ類とカイアシ類が採集（Table 2）されたものについて、両種の 3 周波数の SV の分布を Fig. 7 の下段 d–f に、またこれらの平均値と標準偏差を Table 3 に示す。オキアミ類が採集された定点の音響散乱層の 3 周波数における SV のモードは 38 kHz で -90–-85 dB, 120 kHz と 200 kHz では -80–-75 dB となり、38 kHz が最も小さかった。一方、カイアシ類の音響散乱層の SV のモードは、38 kHz で -100–-95 dB, 120 kHz で -95–-90 dB, 200 kHz で -90–-85 dB となり、オキアミ類と同様に周波数 38 kHz が最も小さ

Table 3

かった。これらのことから、周波数 38 kHz では両種の探知に不利であり、また SV の大小だけでは両種の識別は難しいことが分かった。

TS の周波数差分による種識別 次に、プランクトンネットで採集したオキアミ類とカイアシ類のサイズを用いて計算した各周波数における理論 TS (Fig. 7a-c) をもとに、それぞれの周波数の組み合わせで TS の周波数差分を計算し頻度分布を求めたものを Fig. 8 に示す。周波数差分は、(2) 式により求めた 3 つの周波数の組み合わせである $\Delta TS_{120-38\text{kHz}}$ 、 $\Delta TS_{200-38\text{kHz}}$ 、 $\Delta TS_{200-120\text{kHz}}$ である。横軸は 2 周波数の TS の差分値、縦軸はその頻度を示し、上段はオキアミ類、下段はカイアシ類を示す。TS の差分値は、オキアミ類では、 $6\text{ dB} \leq \Delta TS_{120-38\text{kHz}} \leq 20\text{ dB}$ 、 $6\text{ dB} \leq \Delta TS_{200-38\text{kHz}} \leq 29\text{ dB}$ 、および $-4\text{ dB} \leq \Delta TS_{200-120\text{kHz}} \leq 9\text{ dB}$ であった。一方、カイアシ類では、 $17\text{ dB} \leq \Delta TS_{120-38\text{kHz}} \leq 20\text{ dB}$ 、 $22\text{ dB} \leq \Delta TS_{200-38\text{kHz}} \leq 29\text{ dB}$ 、 $5\text{ dB} \leq \Delta TS_{200-120\text{kHz}} \leq 9\text{ dB}$ であった。カイアシ類の ΔTS の範囲はオキアミ類のものより狭く、また、カイアシ類の ΔTS のモードは 3 周波数の組み合わせすべてにおいてオキアミ類の ΔTS のモードより 6–13 dB 大きかった。そこで、このオキアミ類とカイアシ類の ΔTS の違いが、種と体長に基づく TS の周波数特性の違いに起因していると考え、両種の ΔTS の分布の重複部が最小となる値を境界値として両種の識別を試みた。求めた境界値は $\Delta TS_{120-38\text{kHz}}$ で 18 dB、 $\Delta TS_{200-38\text{kHz}}$ で 23 dB、 $\Delta TS_{200-120\text{kHz}}$ で 5 dB となった。

Fig. 8

次に、 ΔTS の境界値によるオキアミ類とカイアシ類の識別方法を評価するため、2 周波数の ΔTS を用いて両者を識別したうえ、高周波側の SV と理論 TS を用いて音響的に推定した湿重量密度と、プランクトンネットによる採集量から推定した湿重量密度を 18 定点について比較したものを Fig. 9 に示す。(a) がオキアミ類、(b) がカイアシ類で、

Fig. 9

3種類の周波数の組み合わせによる結果とそれらの回帰直線を示した。これら音響推定した湿重量密度と採集量から推定した湿重量密度の相関の有無を ANOVA により評価したところ (Table 4), 全ての周波数の組み合わせにおいて p-値は 0.05 以上となり, これら両者の湿重量密度の値には有意な相関が認められなかった。

Table 4

SV の周波数差分による種識別 次に, 現場で得られた音響散乱層の SV の周波数特性と構成種の関係について調べた。Table 3 において, オキアミ類の音響散乱層の平均 SV は, 周波数 38 kHz で -87.0 dB (SD=6.1 dB), 120 kHz で -77.9 dB (SD=5.4 dB), 200 kHz で -78.1 dB (SD=6.2 dB) となり, 38 kHz が他の周波数に比べて約 9 dB 小さかった。また, カイアシ類の平均 SV は, 周波数 38 kHz が -91.6 dB (SD=5.7 dB), 120 kHz が -89.7 dB (SD=3.5 dB), 200 kHz が -87.3 dB (SD=2.6 dB) となり, やはり 38 kHz が最も小さかった。次に, ΔSV に着目すると, オキアミ類では $\Delta SV_{120-38\text{kHz}}$ が 9.0 dB (SD=5.9 dB), $\Delta SV_{200-38\text{kHz}}$ が 8.9 dB (SD=7.1 dB) であるのに対し, $\Delta SV_{200-120\text{kHz}}$ は -0.1 dB (SD=1.9 dB) であり, カイアシ類については, $\Delta SV_{120-38\text{kHz}}$ が 1.9 dB (SD=5.5 dB), $\Delta SV_{200-38\text{kHz}}$ が 4.3 dB (SD=6.1 dB), $\Delta SV_{200-120\text{kHz}}$ は 2.4 dB (SD=2.5 dB) であった。オキアミ類とカイアシ類の ΔSV の分布を Fig. 10 に示すが, 両種とも $\Delta SV_{120-38\text{kHz}}$ (Fig. 10a) と $\Delta SV_{200-38\text{kHz}}$ (Fig. 10b) では分布の幅が広く, 互いに重複していることがわかる。しかし, $\Delta SV_{200-120\text{kHz}}$ (Fig. 10c) では分布の幅は狭く, かつオキアミ類とカイアシ類のモードの位置が異なるため両種を分離できる可能性を示した。そこで, $\Delta SV_{200-120\text{kHz}}$ (Fig. 10c) における両種の分布の重複部が最小となる $\Delta SV_{200-120\text{kHz}} = 2.0 \text{ dB}$ を境界値として両種の識別を試みた。

Fig. 10

ΔSV の境界値による両種の識別方法を評価するため, ΔSV により両

者を識別したうえ、高周波側の SV と理論 TS を用いて音響推定した湿重量密度と、プランクトンネットによる採集量から推定した湿重量密度を 18 定点について比較したものを Fig. 11 に示す。オキアミ類 (Fig. 11a) とカイアシ類 (Fig.11b) それぞれの 3 種類の周波数の組み合わせによる結果とそれらの回帰直線を示した。音響推定による湿重量密度とネットにより推定した湿重量密度の相関の有無を ANOVA により評価したところ (Table 4), 全ての周波数の組み合わせにおいて p-値は 0.01 以下となり、両者には有意な相関が認められた。

Fig. 11

考察

本研究では、38, 120, 200 kHz の 3 周波数を用いて、オキアミ類とカイアシ類の周波数特性の違いを利用した両種の識別方法を検討した。理論モデルで求めた TS の周波数差分により両種を分離識別することは困難であった (Fig.9) が、現場で観測した SV の周波数差分では両種の分離識別がある程度可能であり、これに基づいて音響推定した湿重量密度とプランクトンネットの採集により推定した湿重量密度は比較的良い相関を示した (Fig. 11, Table 4)。

本研究において、4 定点で採集された平均体長 14.3 mm のオキアミ類の $\Delta SV_{120-38kHz}$ は平均 9.0 dB (SD = 5.9 dB) であったが、Murase *et al.*¹⁰⁾ は平均体長 16.6 mm のオキアミ類について 11.6 dB–15.3 dB, Simard and Sourisseau⁵¹⁾ は 8.6 dB (SD=5.8 dB), De Robertis *et al.*⁵²⁾ は 13.8 dB (SD=2.9 dB) を得ており、これらと大きな差はなかった。また、周波数 200kHz と 38kHz の組み合わせにおいて、本研究で得られたオキアミ類の $\Delta SV_{200-38kHz}$ の平均は 8.9 dB (SD=7.1 dB) であり、Demer⁵³⁾ が平均体長 26 mm のオキアミ類について得た $\Delta SV_{200-38kHz} = 10$ dB とほぼ

一致した。Demer⁵³⁾ はまた、周波数 200kHz と 120kHz の組み合わせにおいて、 $\Delta SV_{200-120kHz} = -1$ dB と報告したが、本研究の $\Delta SV_{200-120kHz}$ の平均 -0.1 dB (SD=1.9 dB) に近かった。

一方、本研究において平均体長 3.1 mm のカイアシ類の $\Delta SV_{120-38kHz}$ は平均 1.9 dB (SD=5.5 dB) であった (Table 3) のに対し、Murase *et al.*¹⁰⁾ は体長範囲 1.0–7.1 mm のカイアシ類の $\Delta SV_{120-38kHz}$ として 13.7–17.3 dB を得ており、本研究の結果よりかなり大きかった。

2 周波差分法によるカイアシ類の識別は、理論モデルにより推定した TS の周波数差に基づいて行われるのが一般的であり、本研究においても両種の TS を DWBA 変形円筒モデルにより推定した。そして、体長分布に基づいて推定したカイアシ類の ΔTS の範囲はオキアミ類と明確に分離された (Fig.8) が、これを基に推定した湿重量密度はネットで推定した湿重量密度との間に相関を示さなかった。Holliday and Pieper¹⁸⁾ と Madureira *et al.*²³⁾ および Mitson *et al.*⁵⁴⁾ は、周波数差分を用いた生物の識別において、対象生物の大きさが重要な要素であるとした。オキアミ類とカイアシ類の体長が大きく異なれば、 ΔTS の相違が顕著に現れ理論的には両種の識別が容易となる (Fig. 8) が、 ΔTS を用いて推定した湿重量密度は、ネットサンプリングによって推定された湿重量密度より、オキアミ類については過大に、カイアシ類については過小に推定される傾向があった (Fig.9)。この理由について、以下のように考察した。Fig. 6 において、両種を識別するためにはそれぞれの ΔTS に明確な差異があることが条件である。しかし Fig. 6 において両種の ΔTS を比較すると、小さなオキアミ類 (5 mm 程度) とカイアシ類の ΔTS は近くなり、また、オキアミ類の体長が 20 mm を超えると、 ΔTS の値は増加しカイアシ類の ΔTS に近づいてくる。すなわち、

プランクトンネットの採集能力の制限により，密度推定において大きなオキアミ類を過小評価したため，これらが設定した ΔTS の範囲に含まれず，さらにはカイアシ類であると誤判定されたため ΔTS による両種の識別がうまくいかなかったものと考えられた。

周波数差分による生物の識別は，対象生物の大きさや体組織の特性に伴って変化する音響散乱の周波数特性を利用するため，周波数の組み合わせが重要となる。本研究では， $\Delta SV_{120-38\text{kHz}}$ ， $\Delta SV_{200-38\text{kHz}}$ ， $\Delta SV_{200-120\text{kHz}}$ の3つの周波数の組み合わせにより，オキアミ類とカイアシ類の識別を試みた。一般に動物プランクトンは，低周波より高周波で音響散乱が強く，⁵⁵⁾ そのSVは生物密度が高いほど大きくなるが，大型の動物プランクトンのSVの周波数差は小さく，小型の動物プランクトンのSVの周波数差は大きくなる。北海道周辺海域に分布するオキアミ類は，体長が20 mm以上に成長する大型動物プランクトンで，長さが数十 m を超える巨大な群を形成する。^{7, 56, 57)} 反面，カイアシ類は，最大体長が10 mm未満の小型動物プランクトンで，ほとんど群を形成しない。^{28, 58)} したがって，一般に，大きい群を形成するオキアミ類のSVはカイアシ類より大きく， ΔSV はカイアシ類等の小型の生物よりも小さくなると予想される。そこで，Table 3に示した3周波数の組み合わせによる ΔSV と各周波数におけるSVとの関係をFig. 12に示した。横軸は2周波数のSVの差である ΔSV 値を，縦軸はその2周波数のうち高周波数のSVを示す。周波数120 kHzと38 kHzの関係（Fig. 12a）を見ると，周波数120 kHzにおけるオキアミ類とカイアシ類のSVは-88 dBでほぼ分離することができるが，両種の $\Delta SV_{120-38\text{kHz}}$ にはほとんど差がなかった。周波数200 kHzと38 kHz（Fig. 12b）についても，約-86 dBのSVで両種がほぼ分離されたが， $\Delta SV_{200-38\text{kHz}}$ には

Fig. 12

両種の差は見られなかった。一方、周波数 200 kHz と 120 kHz の組み合わせ (Fig. 12c) において、SV では約 -80 dB、 $\Delta SV_{200-120\text{kHz}}$ で約 2 dB を境にオキアミ類とカイアシ類にほぼ分離できる。SV は、生物の密度に依存するため、必ずしも両種の識別の根拠にはならない。よって、周波数差法によるオキアミ類とカイアシ類の識別は 3 周波数の組み合わせの中でも $\Delta SV_{200-120\text{kHz}}$ が最も適当であると考えられた。このことに関し、Hewitt *et al.*⁵⁹⁾ はオキアミ類の識別には $4\text{ dB} \leq \Delta SV_{120-38\text{kHz}} \leq 16\text{ dB}$ よりも $-4\text{ dB} \leq \Delta SV_{200-120\text{kHz}} \leq 2\text{ dB}$ の方が識別力が高いことを報告している。

既往の周波数差法による生物の識別に関する研究は、主に周波数 120 kHz と 38 kHz を用いて有鰐魚類と大型オキアミ類を識別するものであり、小型の動物プランクトンやカイアシ類に関する研究は多くない。^{23,}
⁶⁰⁾ 本研究ではこれらの動物プランクトンが周波数 120 kHz と 200 kHz で強い音響散乱を示すことを利用し、さらにこれら 2 周波数の SV の差 $\Delta SV_{200-120\text{kHz}}$ を用いることによって、オキアミ類とカイアシ類の識別を試みた。その結果、小型のオキアミ類やカイアシ類が多く分布する噴火湾では、高周波数の組み合わせによる $\Delta SV_{200-120\text{kHz}}$ が小型の動物プランクトンを識別するのに適していることがわかった。ただし、これらの識別はオキアミ類やカイアシ類が単一種の群れを形成している場合に限られ、両種が混在している場合、これらの識別は不可能である。さらに、高周波数ほど探知距離が短くなるので深層に分布する生物を識別することも難しいうえ、深層になるとノイズの影響が大きくなってくるので注意が必要である。

高周波数を用いた動物プランクトンの識別では、微弱な反応を解析対象から除外するスレッシュホールドレベルの設定も重要である。^{23, 53, 61)}

Madureira *et al.*⁶¹⁾ は、ナンキョクオキアミの識別に関して周波数 120 kHz のスレッシュホルドレベルを 5 段階に設定してオキアミ類の ΔSV を調べた。Ballón *et al.*⁶²⁾ は周波数 120 kHz の SV のスレッシュホルドレベルを -72 – -53 dB に設定して小型のプランクトンを識別し、Miyashita *et al.*⁸⁾ と Kang *et al.*⁹⁾ は、-80 dB 以下の反応を背景雑音として除外しただけでなく、カイアシ類のような小型の動物プランクトンの影響を除去した。カイアシ類の音響散乱は魚類やオキアミ類に比べてかなり弱く、本研究で測定したカイアシ類の平均 SV も 3 周波数全てで -80 dB より小さく、理論モデルにより推定したカイアシ類の TS も -100 dB より小さかった。^{30, 31)} したがって、スレッシュホルドレベルを高く設定した場合、小型の動物プランクトンが除外される可能性があるので、スレッシュホルドレベルの設定を慎重にする必要があると考えられた。

謝辞

本研究を進めるにあたり、調査およびサンプルの収集に御協力いただいた北海道大学附属練習船うしお丸乗組員諸氏、ならびに北海道大学大学院水産科学院海洋計測学講座音響資源計測学領域の学生、院生諸氏に感謝する。

文献

- 1) 前田辰昭, 中谷敏邦, 高橋豊美, 上野元一. スケトウダラ稚仔の沿岸水域での生活. 水産海洋研究会報 1979; **34**: 81-85.
- 2) 中谷敏邦, 杉本晃一, 高津哲也, 高橋豊美. スケトウダラの年級群豊度に与える噴火湾の環境要因. 水産海洋研究 2003; **67**: 23-28.
- 3) 中谷敏邦. 近年のスケトウダラ太平洋個体群年級群強度と摂餌開始期の海洋環境. 北海道大学水産科学研究彙報 2008; **58**: 1-6.
- 4) Kobari T, Shinada A, Tsuda A. Functional roles of interzonal migrating mesozooplankton in the western subarctic Pacific. *Prog. Oceanogr.* 2003; **57**: 279-298.
- 5) Shinada A, Ban S, Ikeda T. Seasonal changes in the planktonic food web off Cape Esan, southwestern Hokkaido, Japan. *Plankton Benthos Res.* 2008; **3**: 18-26.
- 6) 津田敦. 亜寒帯北太平洋における動物プランクトンを中心とした低次生態系の動態に関する研究. 海の研究 2013; **22**: 85-96.
- 7) Miyashita K, Tetsumura K, Honda S, Oshima T, Kawabe R, Sasaki K. Diel changes in vertical distribution patterns of zooplankton and walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) off the Pacific coast of eastern Hokkaido, Japan, estimated by the volume back scattering strength (Sv) difference method. *Fish. Oceanogr.* 2004; **13**: 99-110.
- 8) Miyashita K, Aoki I, Seno K, Taki K, Ogishima T. Acoustic identification of isada krill, *Euphausia pacifica* Hansen, off the Sanriku coast, north - eastern Japan. *Fish. Oceanogr.* 1997; **6**: 266-271.

- 9) Kang M, Furusawa M, Miyashita K. Effective and accurate use of difference in mean volume backscattering strength to identify fish and plankton. *ICES J. Mar. Sci.* 2002; **59**: 794-804.
- 10) Murase H, Ichihara M, Yasuma H, Watanabe H, Yonezaki S, Nagashima H, Kawahara S, Miyashita K. Acoustic characterization of biological backscatterings in the Kuroshio - Oyashio inter - frontal zone and subarctic waters of the western North Pacific in spring. *Fish. Oceanogr.* 2009; **18**: 386-401.
- 11) Vidal J, Smith SL. Biomass, growth, and development of populations of herbivorous zooplankton in the southeastern Bering Sea during spring. *Deep-Sea Res.* 1986; **33**: 523-556.
- 12) Verity PG, Smetacek V. Organism life cycles, predation, and the structure of marine pelagic ecosystems. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 1996; **130**: 277-293.
- 13) Greenlaw CF. Acoustical estimation of zooplankton populations. *Limnol. Oceanogr.* 1979; **24**: 226-242.
- 14) MacLennan DN, Simmonds EJ. *Fisheries acoustics*. Chapman & Hall, London. 1992.
- 15) Fielding S, Griffiths G, Roe HSJ. The biological validation of ADCP acoustic backscatter through direct comparison with net samples and model predictions based on acoustic-scattering models. *ICES J. Mar. Sci.* 2004; **61**: 184-200.
- 16) Holliday DV, Pieper RE, Kleppel GS. Determination of zooplankton size and distribution with multifrequency acoustic technology. *J. Cons. int. Explor. Mer.* 1989; **46**: 52-61.

- 17) Pieper RE, Holliday DV, Kleppel GS. Quantitative zooplankton distributions from multifrequency acoustics. *J. Plankton Res.* 1990; **12**: 433-441.
- 18) Holliday DV, Pieper RE. Bioacoustical oceanography at high frequencies. *ICES J. Mar. Sci.* 1995; **52**: 279-296.
- 19) Horne JK, Jech JM. Multi-frequency estimates of fish abundance: constraints of rather high frequencies. *ICES J. Mar. Sci.* 1999; **56**: 184-199.
- 20) Jech JM, Michaels WL. A multifrequency method to classify and evaluate fisheries acoustics data. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 2006; **63**: 2225-2235.
- 21) 古澤昌彦. 水産資源推定のための超音波による魚群探知に関する研究. 水産工学研究所研究報告 1990; **11**: 173-249.
- 22) Swartzman G, Brodeur R, Napp J, Hunt G, Demer D, Hewitt R. Spatial proximity of age-0 walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) to zooplankton near the Pribilof Islands, Bering Sea, Alaska. *ICES J. Mar. Sci.* 1999; **56**: 545-560.
- 23) Madureira LSP, Ward P, Atkinson A. Differences in backscattering strength determined at 120 and 38 kHz for three species of Antarctic macroplankton. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 1993; **93**: 17-24.
- 24) Coyle KO. Neocalanus scattering layers near the western Aleutian Islands. *J. Plankton Res.* 1998; **20**: 1189-1202.
- 25) Kirsch J, Thomas GL, Cooney RT. Acoustic estimates of zooplankton distributions in Prince William Sound, spring 1996. *Fish. Res.* 2000; **47**: 245-260.

- 26) Lawson GL, Wiebe PH, Stanton TK, Ashjian CJ. Euphausiid distribution along the Western Antarctic Peninsula — Part A: Development of robust multi-frequency acoustic techniques to identify euphausiid aggregations and quantify euphausiid size, abundance, and biomass. *Deep-Sea Res. II* 2008; **55**: 412-431.
- 27) Foote KG, Knudsen HP, Vestnes G, MacLennan DN, Simmonds EJ. Calibration of acoustic instruments for fish density estimation: a practical guide. Technical Report, ICES Coop. Res. Rep. 1987; **144**.
- 28) Chu D, Foote KG, Stanton TK. Further analysis of target strength measurements of Antarctic krill at 38 and 120 kHz: comparison with deformed cylinder model and inference of orientation distribution. *J. Acoust. Soc. Am.* 1993; **93**: 2985-2988.
- 29) McGehee DE, O'Driscoll RL, Traykovski LVM. Effect of orientation on acoustic scattering from Antarctic krill at 120 kHz. *Deep-Sea Res. II* 1998; **45**: 1273-1294.
- 30) Stanton TK, Chu D. Review and recommendations for the modelling of acoustic scattering by fluid-like elongated zooplankton: euphausiids and copepods. *ICES J. Mar. Sci.* 2000; **57**: 793-807.
- 31) Matsukura R, Yasuma H, Murase H, Yonezaki S, Funamoto T, Honda S, Miyashita K. Measurements of density contrast and sound-speed contrast for target strength estimation of *Neocalanus* copepods (*Neocalanus cristatus* and *Neocalanus plumchrus*) in the North Pacific Ocean. *Fish. Sci.* 2009; **75**: 1377-1387.
- 32) 福田美亮, 向井徹, 澤田浩一, 飯田浩二. 懸垂法を用いたツノナシオキアミ *Euphausia pacifica* の側面方向ターゲットストレン

グス測定. 日本水産学会誌 2012; **78**: 388-398.

- 33) Rasband WS. ImageJ, U. S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, <http://imagej.nih.gov/ij/>, 1997-2012.
- 34) Schneider CA, Rasband WS, Eliceiri KW. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods*. 2012; **9**: 671-675.
- 35) Foote KG. Averaging of fish target strength functions. *J. Acoust. Soc. Am.* 1980; **67**: 504-515.
- 36) Miyashita K, Aoki I, Inagaki T. Swimming behaviour and target strength of isada krill (*Euphausia pacifica*). *ICES J. Mar. Sci.* 1996; **53**: 303-308.
- 37) Endo Y, Yamano F. Diel vertical migration of *Euphausia pacifica* (*Crustacea, Euphausiacea*) in relation to molt and reproductive processes, and feeding activity. *J. Ocean.* 2006; **62**: 693-703.
- 38) Taki K. Vertical distribution and diel migration of euphausiids from Oyashio Current to Kuroshio area off northeastern Japan. *Plankton Benthos Res.* 2008; **3**: 27-35.
- 39) Sogawa S, Sugisaki H, Saito H, Okazaki Y, Ono T, Shimode S, Kikuchi T. Seasonal and regional change in vertical distribution and diel vertical migration of four euphausiid species (*Euphausia pacifica*, *Thysanoessa inspinata*, *T. longipes*, and *Tessarabrachion oculatum*) in the northwestern Pacific. *Deep-Sea Res. I* 2016; **109**: 1-9.
- 40) De Robertis A. Small-scale spatial distribution of the euphausiid *Euphausia pacifica* and overlap with planktivorous fishes. *J. Plankton Res.* 2002; **24**: 1207-1220.
- 41) Matsuura T, Uchikawa K, Sawada K. Relationship between light and

- diel vertical migration of *Diaphus theta* and *Euphausia pacifica* off eastern Hokkaido. *Fish. Sci.* **78**: 503-513.
- 42) Barkley RA. The theoretical effectiveness of towed-net samplers as related to sampler size and to swimming speed of organisms. *Journal du Conseil* 1964; **29**: 146-157.
- 43) 藤森康澄, 向井徹, 山本潤. プランクトンネットによるオキアミ採集における人工照明の効果. *日本水産学会誌* 2010; **76**: 1080-1082.
- 44) Kobari T, Ikeda T. Vertical distribution, population structure and life cycle of *Neocalanus cristatus* (Crustacea: Copepoda) in the Oyashio region, with notes on its regional variations. *Mar. Biol.* 1999; **134**(4): 683-696.
- 45) Shoden S, Ikeda T, Yamaguchi A. Vertical distribution, population structure and lifecycle of *Eucalanus bungii* (Copepoda: Calanoida) in the Oyashio region, with notes on its regional variations. *Mar. Biol.* 2005; **146**(3), 497-511.
- 46) 嶋田宏, 坂口健司, 森泰雄, 渡野邊雅道, 板谷和彦, 浅見大樹. 北海道周辺 4 海域 (道東・道南太平洋, 北部日本海および南部オホーツク海)における動物プランクトンバイオマスおよび種組成の季節変化と年変動. *日本プランクトン学会報* 2012; **59**(2): 63-81.
- 47) Iida K, Mukai T, Hwang D. Relationship between acoustic backscattering strength and density of zooplankton in the sound-scattering layer. *ICES J. Mar. Sci.* 1996; **53**: 507-512.
- 48) Motoda S. Devices of simple plankton apparatus. *Mem. Fac. Fish.*,

Hokkaido Univ. 1959; **7**: 73-94.

- 49) 大谷清隆, 秋葉芳雄. 噴火湾の海峡変動の研究. I. 湾水の周年変化. 北海道大学水産科学研究彙報 1970; **20**: 303-312.
- 50) 大谷清隆. 噴火湾の海峡変動の研究. II. 噴火湾に流入・滞留する水の特性. 北海道大学水産科学研究彙報 1971; **22**: 58-66.
- 51) Simard Y, Sourisseau M. Diel changes in acoustic and catch estimates of krill biomass. *ICES J. Mar. Sci.* 2009; **66**: 1318-1325.
- 52) De Robertis A, McKelvey DR, Ressler PH. Development and application of an empirical multifrequency method for backscatter classification. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 2010; **67**: 1459-1474.
- 53) Demer DA. An estimate of error for the CCAMLR 2000 survey estimate of krill biomass. *Deep-Sea Res. II* 2004; **51**: 1237-1251.
- 54) Mitson RB, Simard Y, Goss C. Use of a two-frequency algorithm to determine size and abundance of plankton in three widely spaced locations. *ICES J. Mar. Sci.* 1996; **53**: 209-215.
- 55) Greenlaw CF. Backscattering spectra of preserved zooplankton. *J. Acoust. Soc. Am.* 1977; **62**: 44-52.
- 56) Hanamura Y, Kotori M, Hamaoka S. Daytime surface swarms of the euphausiid *Thysanoessa inermis* off the west coast of Hokkaido, northern Japan. *Mar. Biol.* 1989; **102**: 369-376.
- 57) Taki K. Biomass and production of the euphausiid *Euphausia pacifica* along the coastal waters off north - eastern Japan. *Fish. Sci.* 2006; **72**: 221-232.
- 58) 山口篤. 親潮域における動物プランクトン研究の最近の進歩. 北大水産紀要. 2011; **53**: 13-18.

- 59) Hewitt RP, Demer DA, Jennifer HE. An 8-year cycle in krill biomass density inferred from acoustic surveys conducted in the vicinity of the South Shetland Islands during the austral summers of 1991–1992 through 2001–2002. *Aquat. Living Resour.* 2003; **16**: 205-213.
- 60) Jarvis T, Kelly N, Kawaguchi S, van Wijk E, Nicol S. Acoustic characterisation of the broad-scale distribution and abundance of Antarctic krill (*Euphausia superba*) off East Antarctica (30-80° E) in January-March 2006. *Deep-Sea Res. II* 2010; **57**: 916-933.
- 61) Madureira LS, Everson I, Murphy EJ. Interpretation of acoustic data at two frequencies to discriminate between Antarctic krill (*Euphausia superba* Dana) and other scatterers. *J. Plankton Res.* 1993; **15**: 787-802.
- 62) Ballón M, Bertrand A, Lebourges-Dhaussy A, Gutiérrez M, Ayón P, Grados D, Gerlotto F. Is there enough zooplankton to feed forage fish populations off Peru? An acoustic (positive) answer. *Prog. Oceanogr.* 2011; **91**: 360-381.

Fig. 1 Study area around Funka Bay, Hokkaido. Lines indicate cruise tracts for hydroacoustic sampling of zooplankton abundance. Circles indicate both hydrographic (CTD) and net sampling stations in March 2012.

Fig. 2 Echograms recorded at 38 kHz (a), 120 kHz (b) and 200 kHz (c) on 8 March 2012 from station E to L. Echograms were recorded at a ship speed of 10 knots. Transect distance is indicated by 2-km bars along the horizontal axis. Vertical profiles of temperature (black solid line) and salinity (red solid line) at Station E and L are also shown in (a).

Fig. 3 Distribution of copepods and krill body lengths collected with ring net sampling at 18 locations in March 2012. Upper panel and lower panel indicate krill and copepods, respectively.

Fig. 4 Echograms of sound scattering layer during diel vertical migration (DVM) around sunset (a). Acoustic data were collected at station K during the ship has stopped. Zooplankton sampling are shown on the echograms by white solid lines. The density of wet weight of zooplankton collected using the ring-net are shown in (b).

Fig. 5 Averaged target strength versus body length of krill (a) and copepods (b) estimated by the DWBA model. Broken line, dotted line and solid line indicate 38, 120 and 200 kHz frequencies, respectively. The body length indicate total length (TL) of krill and prosome length (PL) of copepods, respectively.

Fig. 6 Relationship between body length and frequency difference of TS calculated from the DWBA model. Broken line, dotted line and solid line indicate the frequency difference of $\Delta TS_{120-38 \text{ kHz}}$, $\Delta TS_{200-38 \text{ kHz}}$ and $\Delta TS_{200-120 \text{ kHz}}$, respectively: (a) krill, (b) copepods. The body length indicate TL of krill and PL of copepods, respectively.

Fig. 7 Target strength distribution estimated from body length distribution using the DWBA model: (a), (b), (c). Body lengths collected with the ring net are shown in Fig. 3. The SV distribution was measured in and around Funka Bay using 38 (d), 120 (e) and 200 (f) kHz of krill and copepods. SV from 2m by 10 ping bins corresponding to Table 3 for the net sampling depth layer. The white bars and black bars indicate krill and copepods, respectively.

Fig. 8 The ΔTS ranges estimated from the DWBA model in Fig. 6 for a selection of length ranges and frequency pairs : (a) $\Delta TS_{120-38 \text{ kHz}}$; (b) $\Delta TS_{200-38 \text{ kHz}}$; (c) $\Delta TS_{200-120 \text{ kHz}}$. The upper panels and lower panels indicate krill and copepods, respectively.

Fig. 9 Comparison of density of wet weight estimated by acoustical method based on frequency differences of TS with density of wet weight collected in the ring net: (a) krill; (b) copepods. Triangles, crosses and circles indicate the estimated density of wet weight by frequency pairs $\Delta TS_{120-38 \text{ kHz}}$, $\Delta TS_{200-38 \text{ kHz}}$ and $\Delta TS_{200-120 \text{ kHz}}$, respectively.

Fig. 10 Histogram of average ΔSV for 2m by 10 ping analysis bins identified as krill (upper panels) and copepods (lower panels) based on Table 3 by ring net catches: (a) $\Delta SV_{120-38 \text{ kHz}}$; (b) $\Delta SV_{200-38 \text{ kHz}}$; (c) $\Delta SV_{200-120 \text{ kHz}}$.

Fig. 11 Comparison of density of wet weight estimated by acoustical method based on frequency differences of SV with density of wet weight identified in the ring net: (a) krill (b) copepods. Triangles, crosses and circles indicate the estimated density of wet weight by frequency pairs $\Delta SV_{120-38 \text{ kHz}}$, $\Delta SV_{200-38 \text{ kHz}}$ and $\Delta SV_{200-120 \text{ kHz}}$, respectively.

Fig. 12 The relationship between SV and ΔSV . SV shown that the high frequency of the two frequencies. The red circles and black crosses indicate krill and copepods, respectively.

Table 1 Operating parameters for EK60 on T/S *Ushio - maru* during March 2012

Table 2 Catch composition used to identify instances where a species at the sampling site

Note : na, not applied ; ni, not identified

The body length indicate total length of krill and prosome length of copepods, respectively.

Table 3 Summary of volume backscattering strength and ΔSV statistics measured by species

Table 4 Summary of regression relationship between density of wet weight by the ring net and density of wet weight estimated by acoustical method based on frequency differences within ΔTS (Fig. 9) and ΔSV (Fig. 11)

Fig. 1

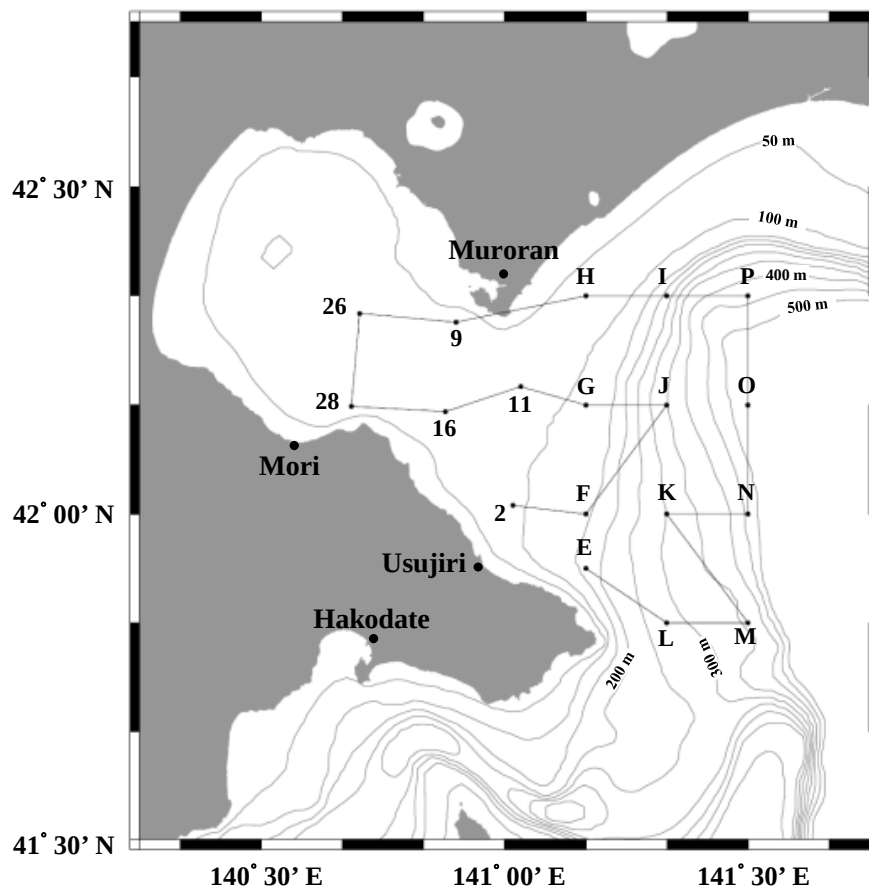


Fig. 2

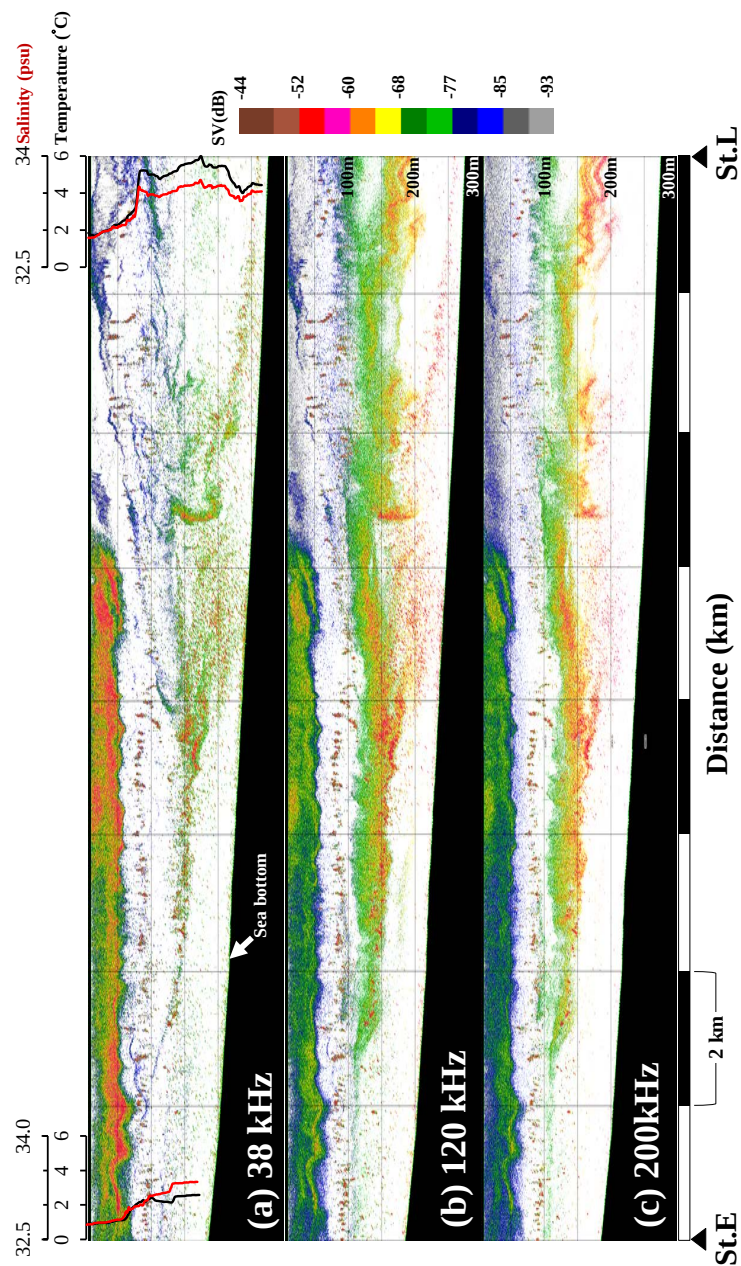


Fig. 3

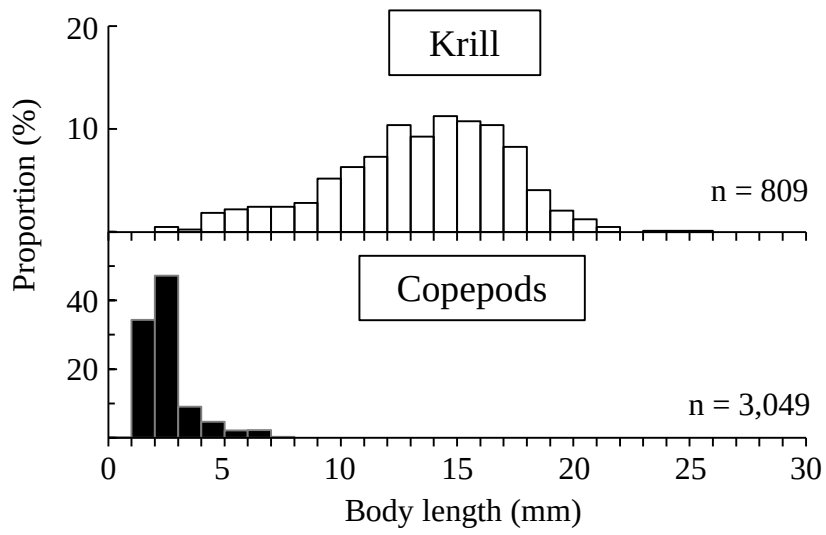


Fig. 4 PDF 用ーカラー, 片段 (Fig. 4 印刷用ーモノクロ, 片段)

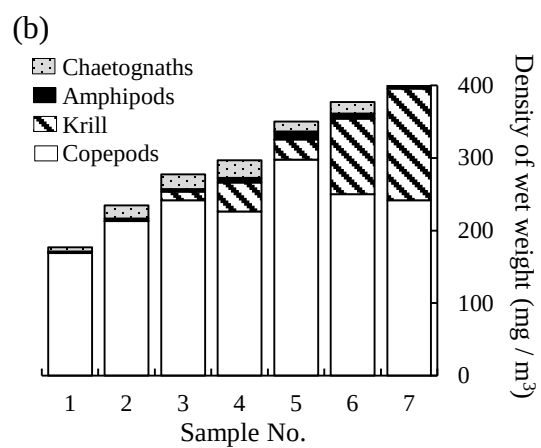
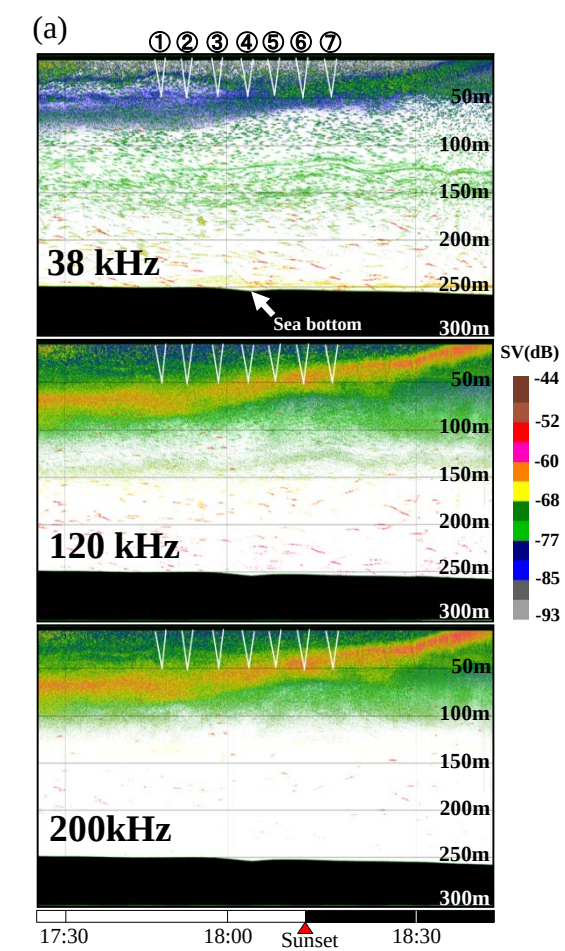


Fig. 5

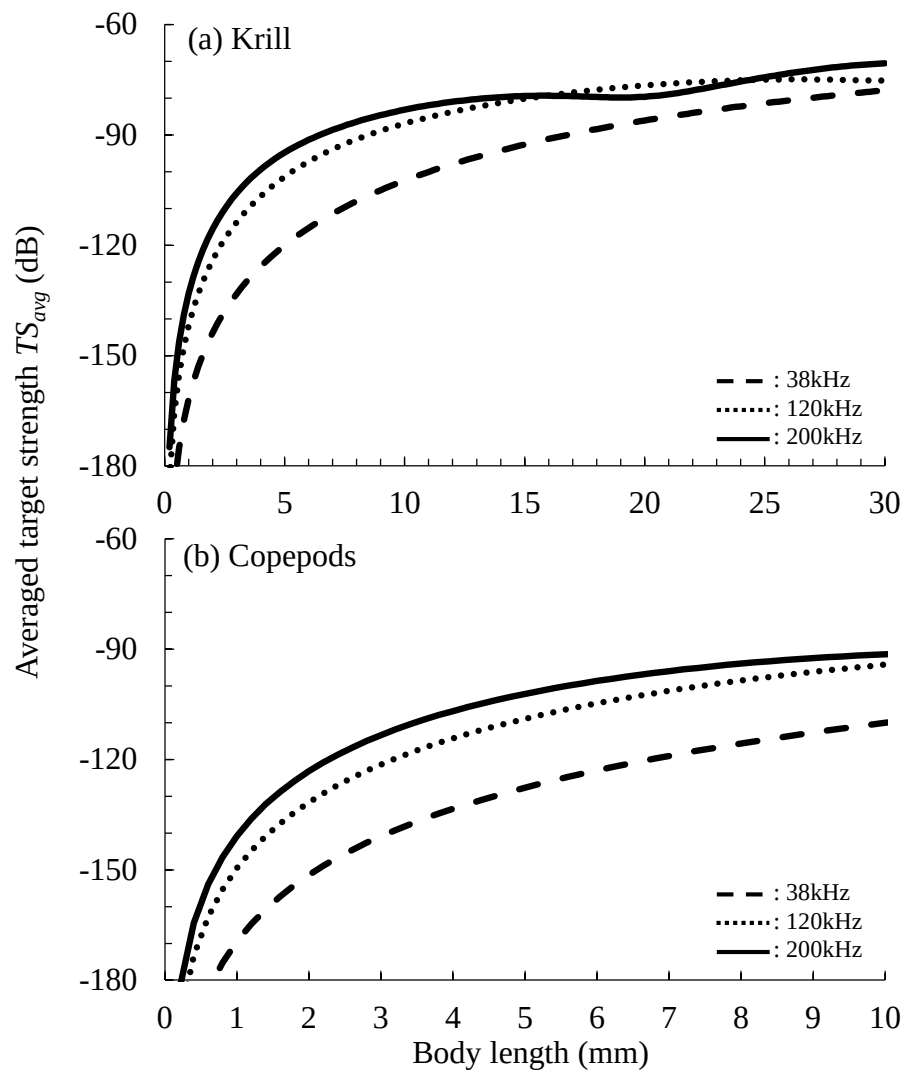


Fig. 6

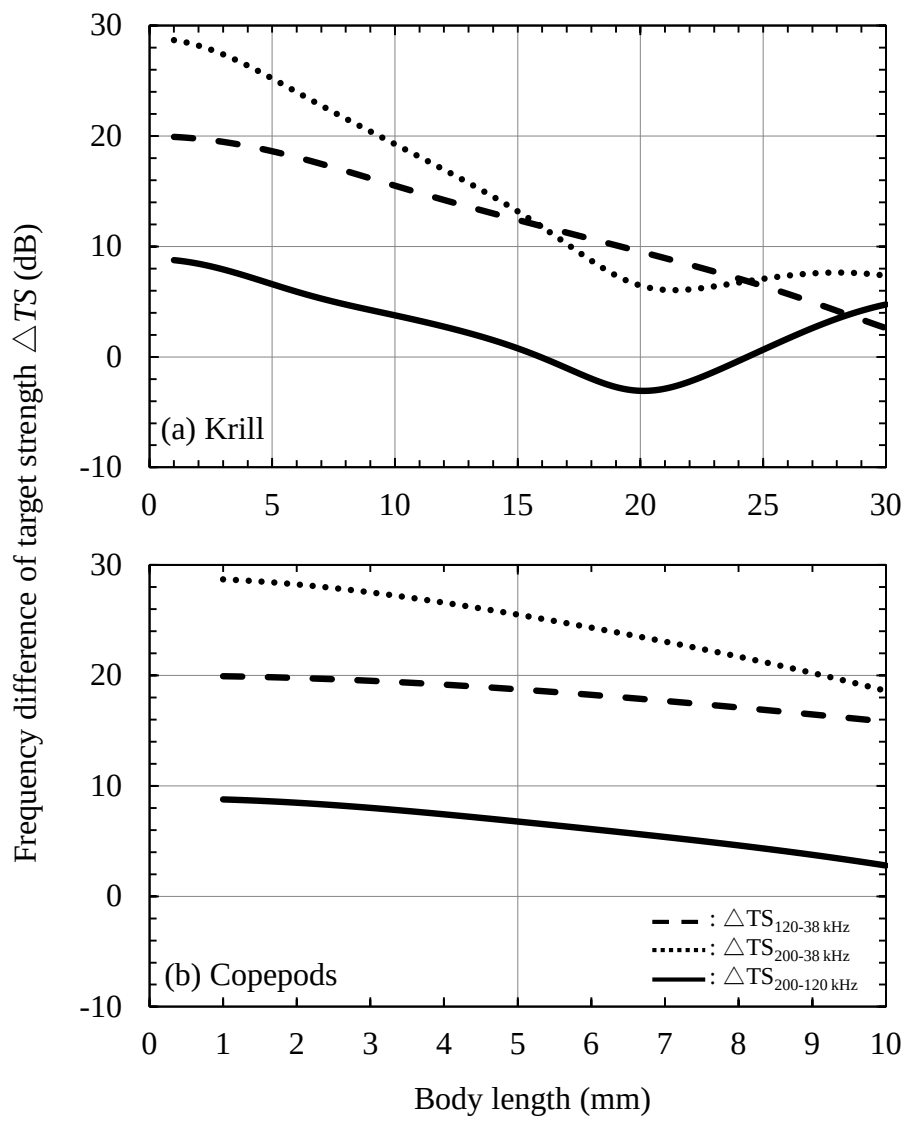


Fig. 7

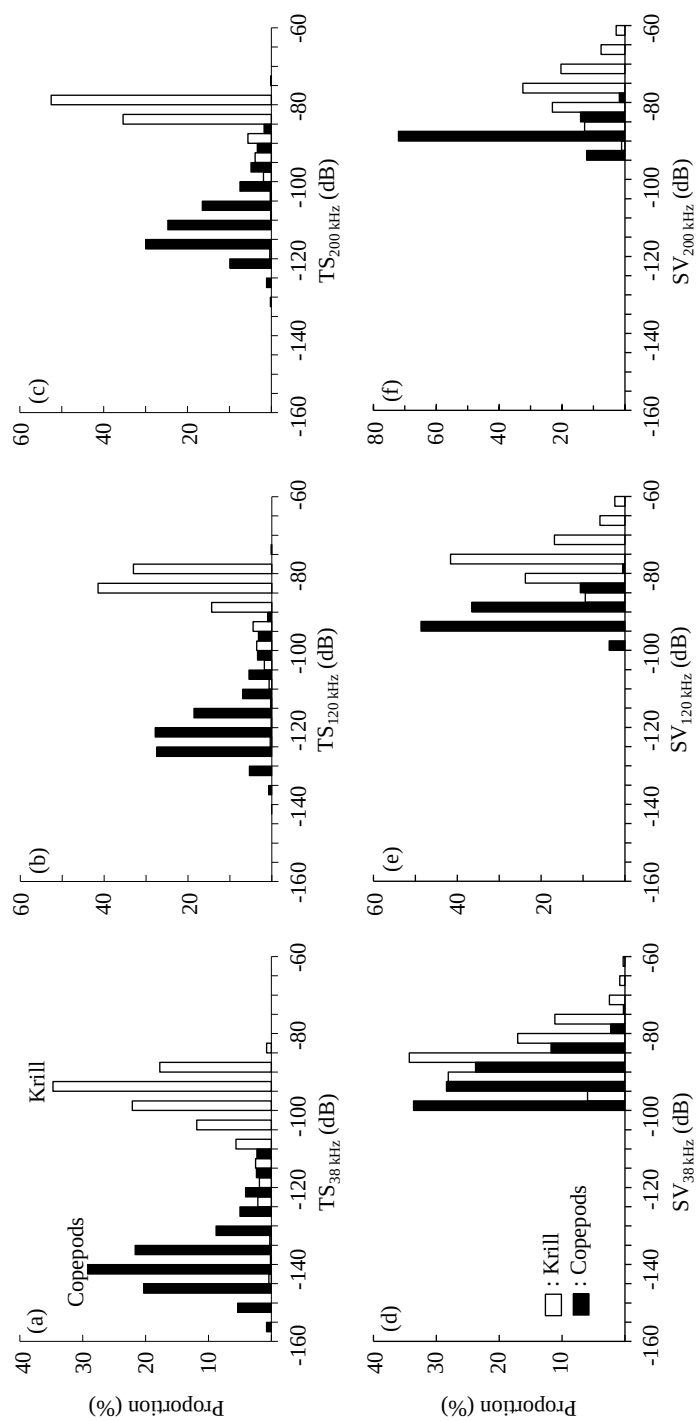


Fig. 8

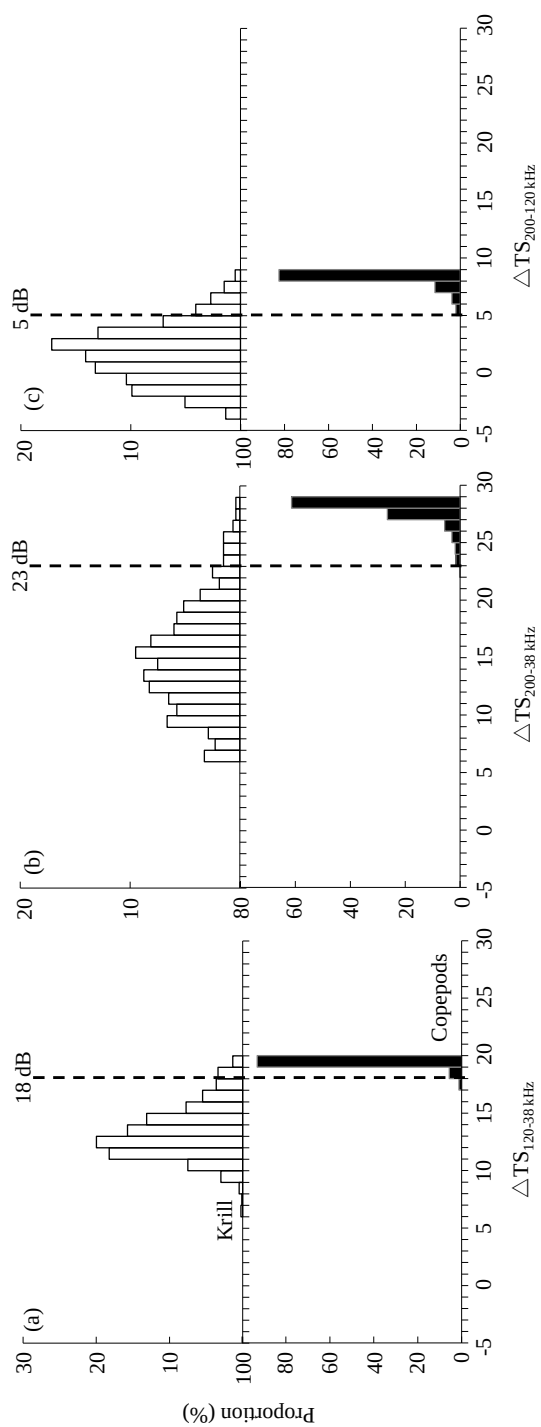


Fig. 9

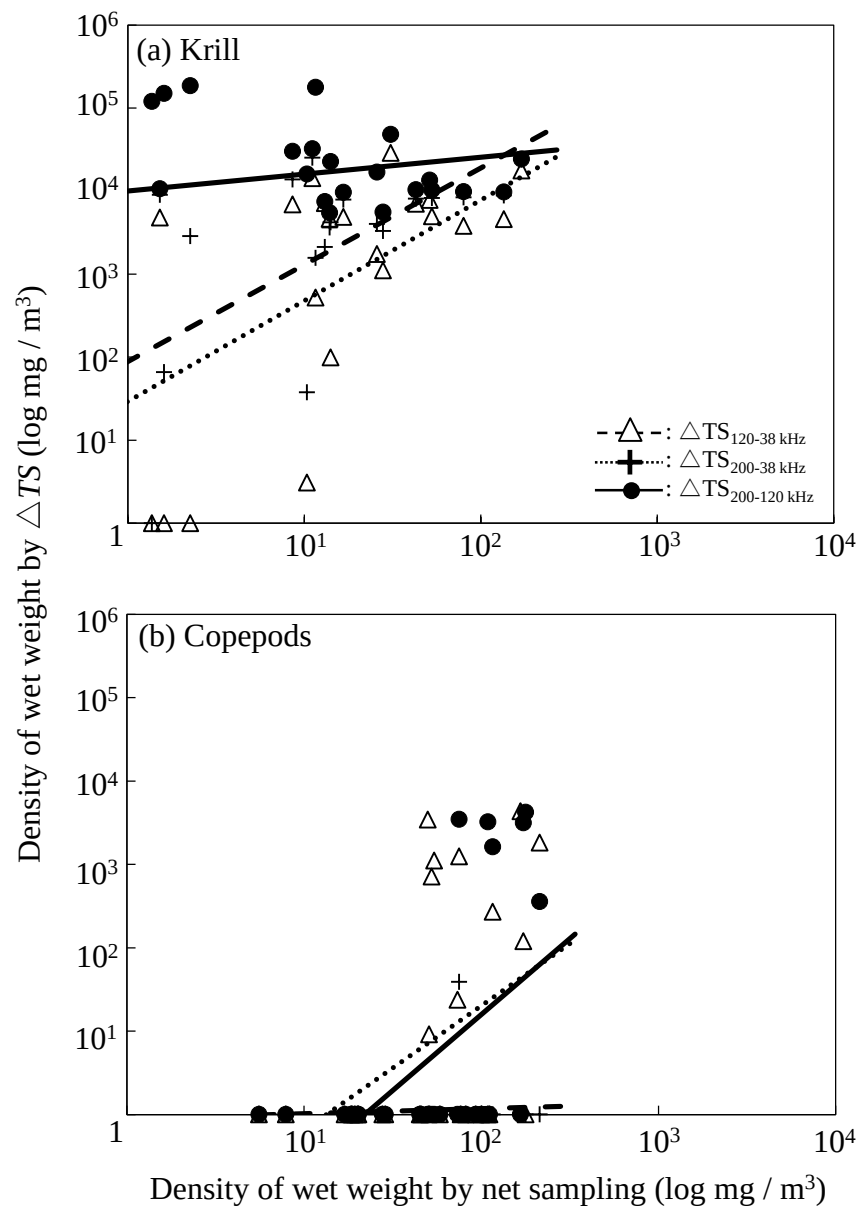


Fig. 10

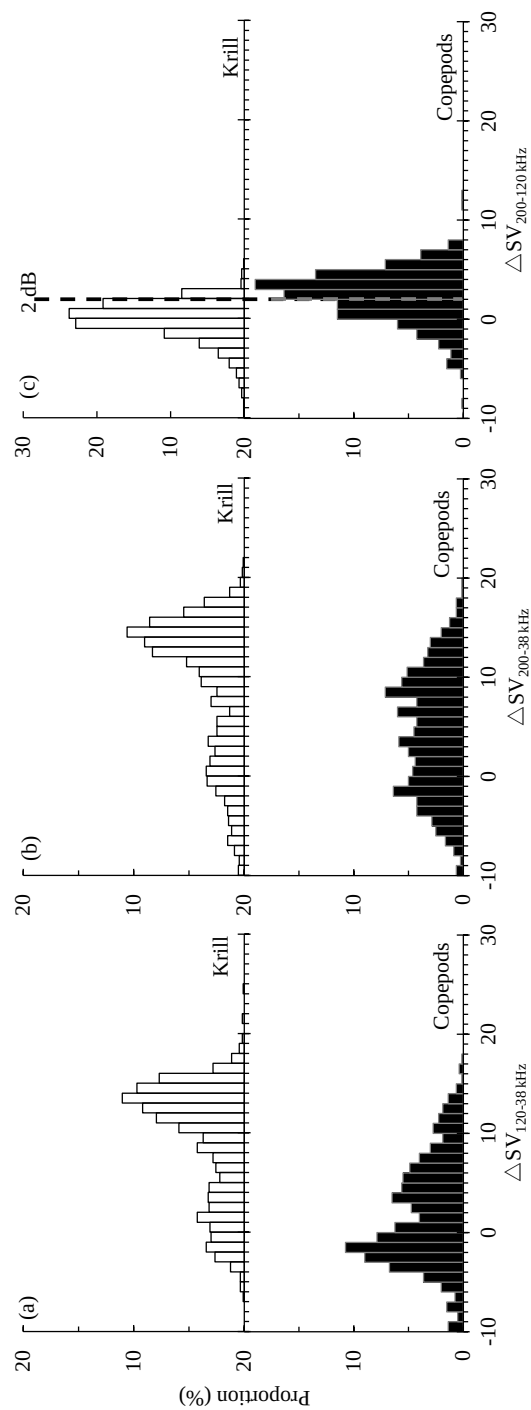


Fig. 11

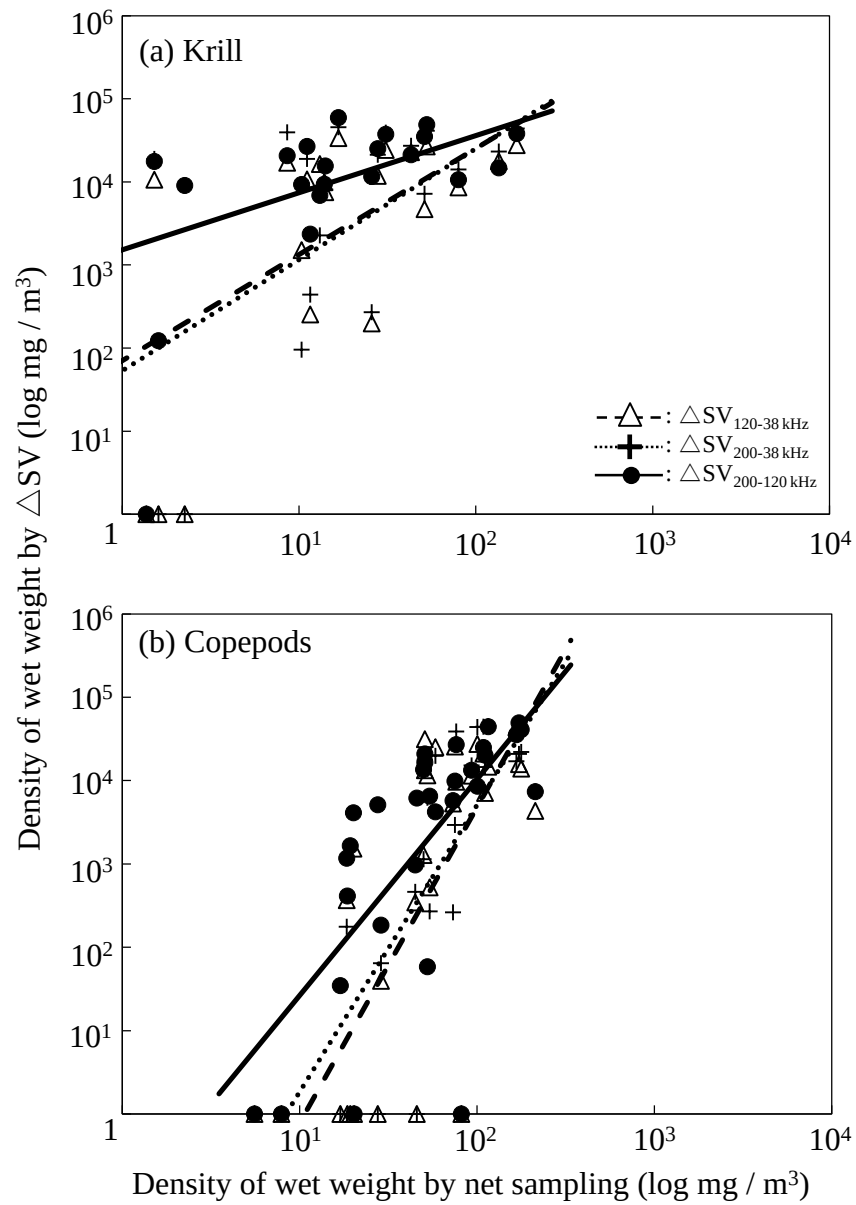


Fig. 12 PDF 用一カラー，片段（印刷用一モノクロ，片段）

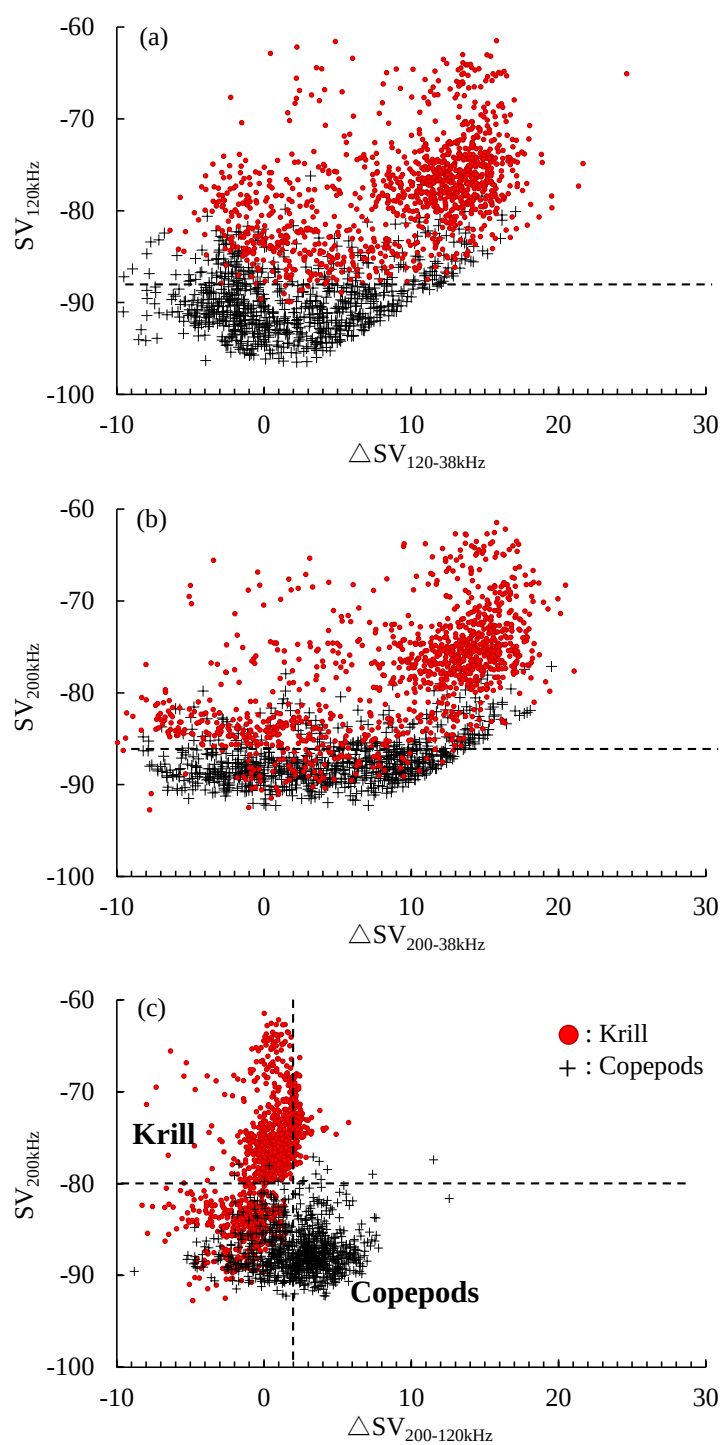


Table 1

Category	Parameters		
Frequency (kHz)	38	120	200
Beam type	Split		
Power (w)	2000	400	120
Beam Angle (deg)			
Athw.	7.7	6.8	6.8
Along.	7.4	6.9	6.6
Pulse duration (ms)	1.024	1.024	1.024
Absorption Coeff. (dB/km)	9.6	29.7	42.7
Sa Correction (dB)	-0.52	-0.29	-0.35
Transducer gain (dB)	25.7	26.2	26.3

Table 2

Stations	SSL (m)	Number of haul	Tow depth (m)	Species	Body length (mm)	Catch biovolume		Catch composition (%)	
					Avg $\pm$ SD	Number (n / m ³)	Weight (mg / m ³)	Number	Weight
E	ni	4	120	Copepods	2.4 $\pm$ 0.9	32.6	28.8	88	90
L	10 - 50	7	70	Copepods	3.1 $\pm$ 0.3	31.3	44.0	97	91
	100 - 200	8	200	Copepods	3.1 $\pm$ 0.9	36.6	58.4	92	57
				Krill	14.3 $\pm$ 2.6	2.2	43.0	6	42
M	50 - 120	12	200	Copepods	2.4 $\pm$ 0.9	63.1	52.5	97	76
				Krill	13.6 $\pm$ 3.9	0.7	13.9	1	20
K	10 - 45	13	80	Copepods	2.7 $\pm$ 1.1	96.5	93.3	90	95
	50 - 80	14	220	Copepods	2.5 $\pm$ 1.0	54.1	50.9	92	93
		15	80	Copepods	2.3 $\pm$ 0.9	155.0	111.2	92	55
				Krill	11.9 $\pm$ 2.7	4.7	80.0	3	40
		16	220	Copepods	2.6 $\pm$ 1.2	48.9	50.8	90	61
				Krill	12.1 $\pm$ 2.7	1.5	28.0	3	34
N	10 - 40	17	40	Copepods	2.3 $\pm$ 1.0	99.1	76.6	95	70
	45 - 80			Krill	16.0 $\pm$ 1.9	1.1	30.9	1	28
		18	150	Copepods	2.3 $\pm$ 0.8	103.7	108.9	96	83
		19	40	Krill	16.8 $\pm$ 1.7	5.7	170.3	4	37
		20	150	Copepods	2.2 $\pm$ 0.8	106.5	116.1	95	66
				Krill	15.3 $\pm$ 2.7	1.9	52.8	2	31
O	10 - 80	22	90	Copepods	2.5 $\pm$ 1.0	163.6	172.8	98	95
	50 - 80	24	90	Copepods	2.3 $\pm$ 0.9	132.2	178.1	94	57
				Krill	14.2 $\pm$ 2.2	6.5	135.1	5	43
P	ni	27	90	Copepods	2.7 $\pm$ 0.6	59.1	73.4	92	85
I	10 - 60	32	180	Copepods	2.2 $\pm$ 0.8	79.4	75.2	97	84
H	10 - 50	36	60	Copepods	2.8 $\pm$ 0.8	33.3	45.0	88	99
9	ni	38	50	Copepods	2.2 $\pm$ 0.6	84.3	81.9	94	99
26	10 - 40	39	50	Copepods	2.1 $\pm$ 0.6	6.9	5.6	50	80
				Walleye pollock (Juveniles)	na	3.3	na	28	na
		40	50	Copepods	2.1 $\pm$ 0.6	9.1	7.9	47	91
				Walleye pollock (Juveniles)	na	6.4	na	36	na
28	10 - 48	44	80	Copepods	2.5 $\pm$ 0.8	15.5	18.5	61	61
				Walleye pollock (Juveniles)	na	4.2	na	17	na
16	ni	46	70	Copepods	2.5 $\pm$ 0.4	20.1	27.7	73	92
		48	70	Copepods	2.5 $\pm$ 0.5	17.2	20.3	70	93
11	ni	50	60	Copepods	2.5 $\pm$ 1.0	45.8	45.8	89	99
G	ni	52	110	Copepods	2.4 $\pm$ 0.7	49.7	50.0	96	99
		54	110	Copepods	2.4 $\pm$ 0.6	2.6	54.2	92	68
				Krill	12.5 $\pm$ 1.5	50.9	25.8	5	32
J	30 - 90	55	30	Copepods	4.2 $\pm$ 1.9	6.3	17.0	36	97
		56	130	Copepods	2.5 $\pm$ 1.1	142.8	166.8	94	94
		57	30	Copepods	4.9 $\pm$ 2.1	5.1	18.6	39	99
		58	130	Copepods	2.6 $\pm$ 0.9	152.9	213.5	94	81
F	ni	62	125	Copepods	2.3 $\pm$ 0.7	23.3	20.1	78	58
				Krill	12.0 $\pm$ 2.7	2.2	10.4	7	30
2	ni	64	80	Copepods	2.3 $\pm$ 0.6	26.0	19.4	85	94

Table 3

Stations	Species	Volume backscattering strength (dB)						Frequency difference (dB)					
		38kHz		120kHz		200kHz		$\Delta SV_{120-38\text{kHz}}$		$\Delta SV_{200-38\text{kHz}}$		$\Delta SV_{200-120\text{kHz}}$	
		Avg $\pm$ SD	Avg $\pm$ SD	Avg $\pm$ SD	Avg $\pm$ SD	Avg $\pm$ SD	Avg $\pm$ SD	Avg $\pm$ SD	Avg $\pm$ SD	Avg $\pm$ SD	Avg $\pm$ SD	Avg $\pm$ SD	Avg $\pm$ SD
L	Krill	-90.4 $\pm$ 6.3	-83.5 $\pm$ 4.0	-85.1 $\pm$ 3.9	-85.1 $\pm$ 3.9	-85.1 $\pm$ 3.9	-85.1 $\pm$ 3.9	6.8 $\pm$ 5.6	5.3 $\pm$ 5.9	5.3 $\pm$ 5.9	5.3 $\pm$ 5.9	-1.5 $\pm$ 1.3	-1.5 $\pm$ 1.3
K	Krill	-88.5 $\pm$ 4.5	-76.9 $\pm$ 1.8	-76.2 $\pm$ 1.8	-76.2 $\pm$ 1.8	-76.2 $\pm$ 1.8	-76.2 $\pm$ 1.8	11.7 $\pm$ 4.3	12.3 $\pm$ 4.4	12.3 $\pm$ 4.4	12.3 $\pm$ 4.4	0.7 $\pm$ 1.2	0.7 $\pm$ 1.2
N	Krill	-82.5 $\pm$ 6.7	-77.4 $\pm$ 7.6	-78.6 $\pm$ 8.1	-78.6 $\pm$ 8.1	-78.6 $\pm$ 8.1	-78.6 $\pm$ 8.1	5.1 $\pm$ 6.4	3.9 $\pm$ 7.8	3.9 $\pm$ 7.8	3.9 $\pm$ 7.8	-1.2 $\pm$ 2.2	-1.2 $\pm$ 2.2
O	Krill	-87.1 $\pm$ 3.6	-75.1 $\pm$ 3.6	-73.8 $\pm$ 4.0	-73.8 $\pm$ 4.0	-73.8 $\pm$ 4.0	-73.8 $\pm$ 4.0	12.0 $\pm$ 3.7	13.3 $\pm$ 4.0	13.3 $\pm$ 4.0	13.3 $\pm$ 4.0	1.3 $\pm$ 1.0	1.3 $\pm$ 1.0
Average		-87.0 $\pm$ 6.1	-77.9 $\pm$ 5.4	-78.1 $\pm$ 6.2	-78.1 $\pm$ 6.2	-78.1 $\pm$ 6.2	-78.1 $\pm$ 6.2	9.0 $\pm$ 5.9	8.9 $\pm$ 7.1	8.9 $\pm$ 7.1	8.9 $\pm$ 7.1	-0.1 $\pm$ 1.9	-0.1 $\pm$ 1.9
I	Copepods	-91.5 $\pm$ 5.4	-90.2 $\pm$ 3.1	-88.0 $\pm$ 2.1	-88.0 $\pm$ 2.1	-88.0 $\pm$ 2.1	-88.0 $\pm$ 2.1	1.3 $\pm$ 4.8	3.5 $\pm$ 5.8	3.5 $\pm$ 5.8	3.5 $\pm$ 5.8	2.2 $\pm$ 2.6	2.2 $\pm$ 2.6
H	Copepods	-91.9 $\pm$ 5.8	-87.4 $\pm$ 4.4	-85.1 $\pm$ 3.4	-85.1 $\pm$ 3.4	-85.1 $\pm$ 3.4	-85.1 $\pm$ 3.4	4.5 $\pm$ 6.6	6.8 $\pm$ 6.5	6.8 $\pm$ 6.5	6.8 $\pm$ 6.5	2.3 $\pm$ 2.2	2.3 $\pm$ 2.2
J	Copepods	-91.6 $\pm$ 7.3	-90.3 $\pm$ 2.9	-86.7 $\pm$ 2.2	-86.7 $\pm$ 2.2	-86.7 $\pm$ 2.2	-86.7 $\pm$ 2.2	1.3 $\pm$ 6.0	5.0 $\pm$ 6.5	5.0 $\pm$ 6.5	5.0 $\pm$ 6.5	3.7 $\pm$ 1.8	3.7 $\pm$ 1.8
Average		-91.6 $\pm$ 5.7	-89.7 $\pm$ 3.5	-87.3 $\pm$ 2.6	-87.3 $\pm$ 2.6	-87.3 $\pm$ 2.6	-87.3 $\pm$ 2.6	1.9 $\pm$ 5.5	4.3 $\pm$ 6.1	4.3 $\pm$ 6.1	4.3 $\pm$ 6.1	2.4 $\pm$ 2.5	2.4 $\pm$ 2.5

Table 4

		Δ TS			Δ SV		
		120-38 kHz	200-38 kHz	200-120 kHz	120-38 kHz	200-38 kHz	200-120 kHz
Krill	R ²	0.18	0.15	0.04	0.26	0.26	0.27
	P	<0.07	<0.13	<0.60	<0.0094	<0.0018	<0.0001
Copepods	R ²	0.19	0.00	0.28	0.26	0.27	0.52
	P	<0.39	<0.45	<0.41	<0.0001	<0.0001	<0.0001